

РАСЧЕТ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГОРЯЧИХ ЭЛЕКТРОНОВ В *n*-КАНАЛЕ СУБМИКРОННОГО МОП-ТРАНЗИСТОРА

Д. С. Сперанский

Известно, что проблема горячих электронов в современных полупроводниковых приборах на основе кремния является весьма актуальной, поскольку перенос носителей заряда в таких структурах происходит в условиях сильных электрических полей. Следствием этой проблемы является деградация параметров приборов. В этой связи чрезвычайно важным является исследование распределения по энергиям электронов при их дрейфе в кремниевом проводящем канале в условиях сильных полей. При этом вид этого распределения позволяет судить о характере процесса разогрева носителей в канале.

В данной работе рассмотрена проблема горячих электронов при моделировании процессов переноса носителей заряда в *n*-канале субмикронного МОП-транзистора. Вычисления методом Монте-Карло помогают справиться со многими математическими и физическими проблемами, относящимися к теории горячих электронов в твёрдых телах. Но этот метод имеет и свои недостатки. Так, например, при расчете частоты выпадения очень маловероятных событий, когда нас интересуют электроны с энергией превышающей среднюю энергию в несколько раз, достаточно сложно проводить вычисления с высокой точностью по методу Монте-Карло обычным способом, т.к. количество выпадения редких событий при моделировании оказывается достаточно мало. Другими словами, достоверность полученных результатов в этом случае оказывается недостаточной из-за малой выборки статистических данных. По этой причине, при моделировании эффектов горячих электронов возникает задача оценки хвоста функции распределения носителей заряда по энергиям, соответствующего высокоэнергетическим электронам. Для такой оценки требуется специальная процедура моделирования, которая бы увеличивала количество выпадения маловероятных событий, но при этом не ухудшала бы гибкость метода Монте-Карло при вычислениях.

Для того, чтобы избавиться от рассмотрения значительного количества траекторий, избыточных для накопления статистических сумм необходимо ввести понятие статистического веса частицы [1].

Чаще всего, траектории движения электронов в импульсном пространстве пересекают области, определяемые средней энергией, а начиная с некоторой энергии ϵ , плотность распределения электронов по энергиям $n(\epsilon)$ будет описываться убывающей экспоненциальной зависимо-

стью, поэтому вероятность попадания траекторий электрона в область больших энергий может стать чрезвычайно малой.

Разобьем рассматриваемое импульсное пространство на две области: R – область редких событий, где $\varepsilon < \varepsilon_1$, и C – область событий, где $\varepsilon > \varepsilon_1$. Энергия ε_1 определяется из условия достаточной точности плотности распределения электронов $n(\varepsilon_1)$ и условия, что $\varepsilon_1 \gg \bar{\varepsilon}$, где $\bar{\varepsilon}$ – средняя энергия электронов. В силу того, что при больших энергиях функция распределения плотности электронов будет убывать по экспоненциальному закону, получаем [1]:

$$\int_0^{\varepsilon_1} n(\varepsilon) d\varepsilon \gg \int_0^{\varepsilon_{\max 1}} n(\varepsilon) d\varepsilon \quad (1)$$

таким образом, точность «хвоста» функции $n(\varepsilon) |_{\varepsilon > \varepsilon_1}$ мала при хорошей точности $n(\varepsilon) |_{\varepsilon < \varepsilon_1}$.

Основная суть рассматриваемого метода, состоит в том, что для каждого электрона, перемещенного в результате процесса блуждания из области C в область R , запоминается точка входа S , из которой стартует M -электронов, вес каждого из которых равен $1/M$. В области редких событий R отслеживается поведение всех M -частиц. Из-за случайности времен свободного пробега и процессов рассеяния все эти частицы будут иметь различные траектории. При выходе из области R их траектории обрываются, кроме одной. Этот электрон возвращается в область C , где ему снова присваивается единичный вес [1].

На основе описанного выше метода была разработана блок-схема, с помощью которой был построен алгоритм моделирования процесса ударной ионизации в n -канале субмикронного МОП полевого транзистора как редкого события.

Начальная точка программы – это определение исследуемой нами физической системы, включающее температуру, напряженность электрического поля и значения физических величин.

Далее для экономии машинного времени мы производим табулирование сумм, требуемых для выбора процесса рассеяния.

Затем следует расчет времени свободного пробега. Мы его определяем точно так же, как и согласно обычному методу Монте-Карло. Затем мы входим в блок: «Изменение волнового вектора \vec{k} при движении в электрическом поле с напряженностью E за время τ ».

Далее стохастически выбираем механизм рассеяния и исходя из выбранного механизма изменяем волновой вектор \vec{k} . Этот этап является важным, потому что если энергия электрона оказалась выше пороговой, то с этого момента необходимо подключать процедуру редких событий. Рассмотрим ее более подробно.

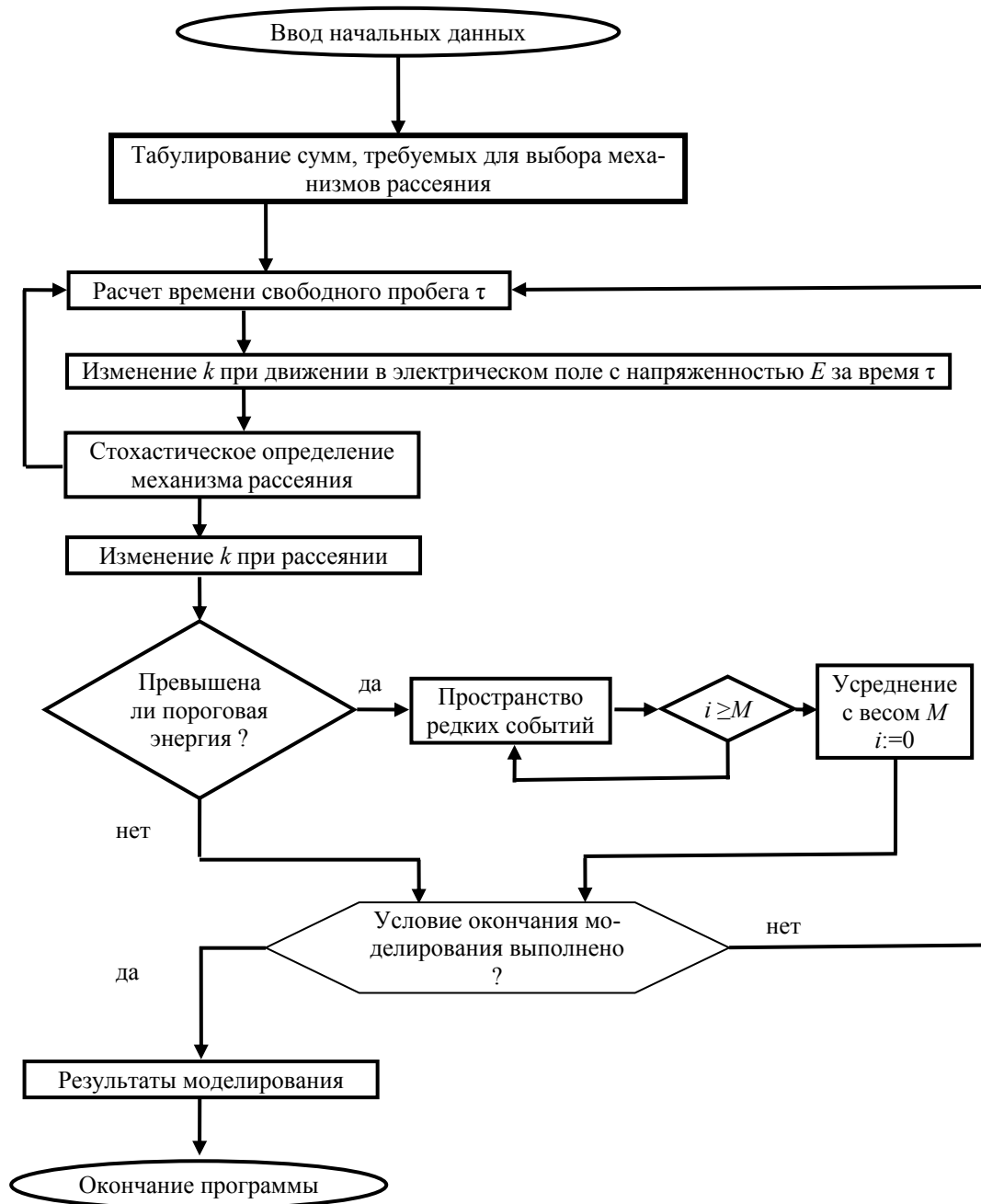


Рис. 1. Блок-схема разработанного алгоритма моделирования, содержащего процедуру редких событий

Итак, если энергия электрона превышает пороговую величину, то мы переходим к процедуре редких событий.

Начиная с этого момента, к акту рассеяния электрона применяется так называемая операция M -свертки, то есть одна траектория электрона разделяется на M различных траекторий. Все эти траектории рассчитываются в порядке следования от 1 до M .

Если проследить за одним из разделенных электронов, то мы видим, что он сначала попадает в блок «Пространство редких событий». При достижении им конца, мы заканчиваем моделировать полет этого электрона и переходим к блоку проверки, определяющему критерий выхода из нашей процедуры.

После блока усреднения возвращаемся в ядро общей программы.

Следует отметить, что коэффициент M выбирается из условия примерного равенства длин траекторий в области редких событий и в области обычных событий, т.е.

$$\int_0^{\varepsilon_1} n(\varepsilon) d\varepsilon = M \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_{\max}} n(\varepsilon) d\varepsilon . \quad (2)$$

Далее проверяются условия окончания моделирования, и, если они достигнуты, то мы переходим к завершению программы.

С использованием приведенного алгоритма и программного комплекса моделирования субмикронного МОП-транзистора, разработанного на кафедре физической электроники, были рассчитаны функции распределения электронов в n -канале полевого транзистора при температуре $T=300$ К и различных эффективных значениях напряженности поля E . Результаты расчета показаны на рис. 2 и рис. 3.

Отн.ед

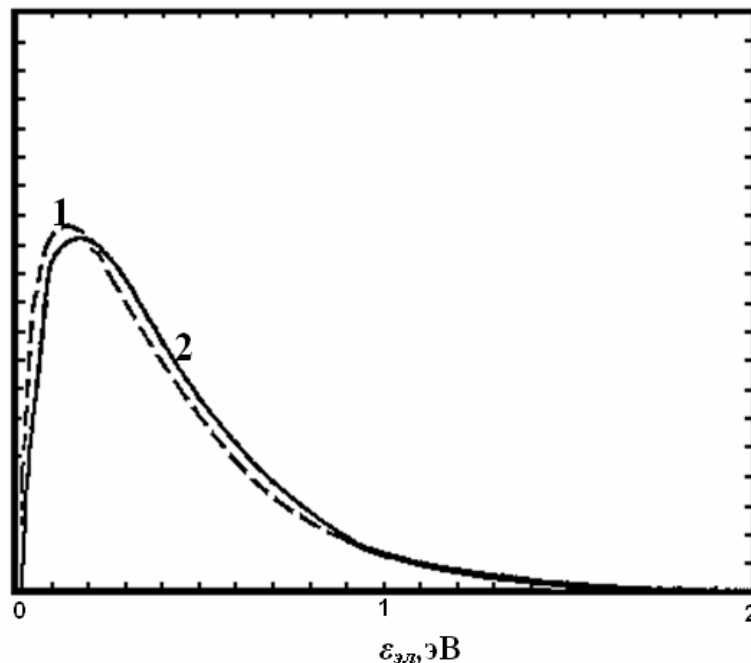


Рис.2. Функции распределения электронов в кремнии , $T=300$ К, $E=2 \cdot 10^7$ В/м:
кривая 1 – данные полученные с помощью разработанного алгоритма,
кривая 2 – литературные данные [2]

Отн. ед

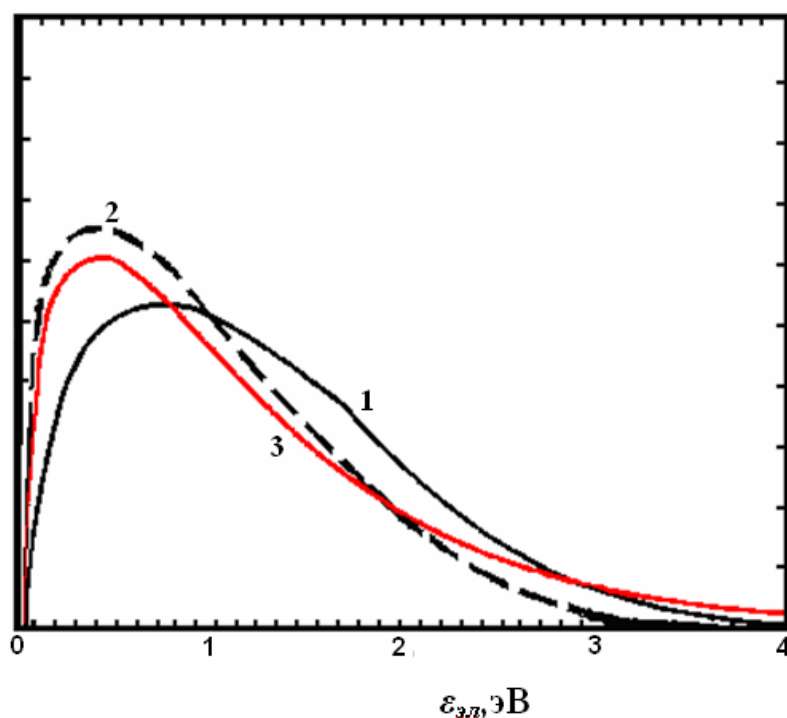


Рис.3. Функции распределения электронов в кремнии, $T=300\text{K}$, $E=5 \cdot 10^7 \text{ В/м}$: кривая 1 – функция построенная с помощью разработанного алгоритма без учета процедуры редких событий, кривая 2 – с включением процедуры редких событий, кривая 3 – литературные данные [2]

Из сравнения приведенных кривых на рисунках следует очевидность необходимости использования разработанной процедуры для расчета области высокоэнергетического хвоста распределения.

В заключении отметим, что проведенные нами в данной работе исследования позволили сделать вывод о том, что включение процедуры редких событий позволяет сократить время построения функции распределения горячих электронов в области хвоста этого распределения при одновременном выполнении условия необходимой точности расчета.

Литература

1. Иващенко В.М., Митин В.В. Моделирование кинетических явлений в полупроводниках. Метод Монте-Карло. //Киев: Наукова думка. 1990.- 192с.
2. Chen Y.-Z., Tang T.W. Impact ionization coefficient and energy distribution function at high fields in semiconductors //J. Appl. Phys. – 1989.-65, N 11. - P.4279 – 4287.
3. Борздов В.М. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники / В.М. Борздов, О.Г. Жевняк, Ф.Ф. Комаров, В.О. Галенчик. -Минск: БГУ, 2007. —175с.
4. Хокни Р., Иствуд Д. Численное моделирование методом частиц. -М.: Мир, 1987. 640 с.
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В 2 т. – М.: Мир, 1984. Т.2 456с